

Klimawandel und wandelbare Atmosphäre: Physik und Modellierung

# Die Stratosphäre im Klimasystem

## Unmittelbare Veränderungen und Rückkopplungseffekte

Martin Dameris

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) | Oberpfaffenhofen | 82234 Wessling

Prof. Dr. **Martin Dameris** | Seniorwissenschaftler  
Telefon +49 8153 28-1558 | Telefax +49 8153 28-1841 | [martin.dameris@dlr.de](mailto:martin.dameris@dlr.de)  
[www.dlr.de/ipa](http://www.dlr.de/ipa) | [www.pa.op.dlr.de/~MartinDameris](http://www.pa.op.dlr.de/~MartinDameris)



Knowledge for Tomorrow



# Die Stratosphäre im Klimasystem

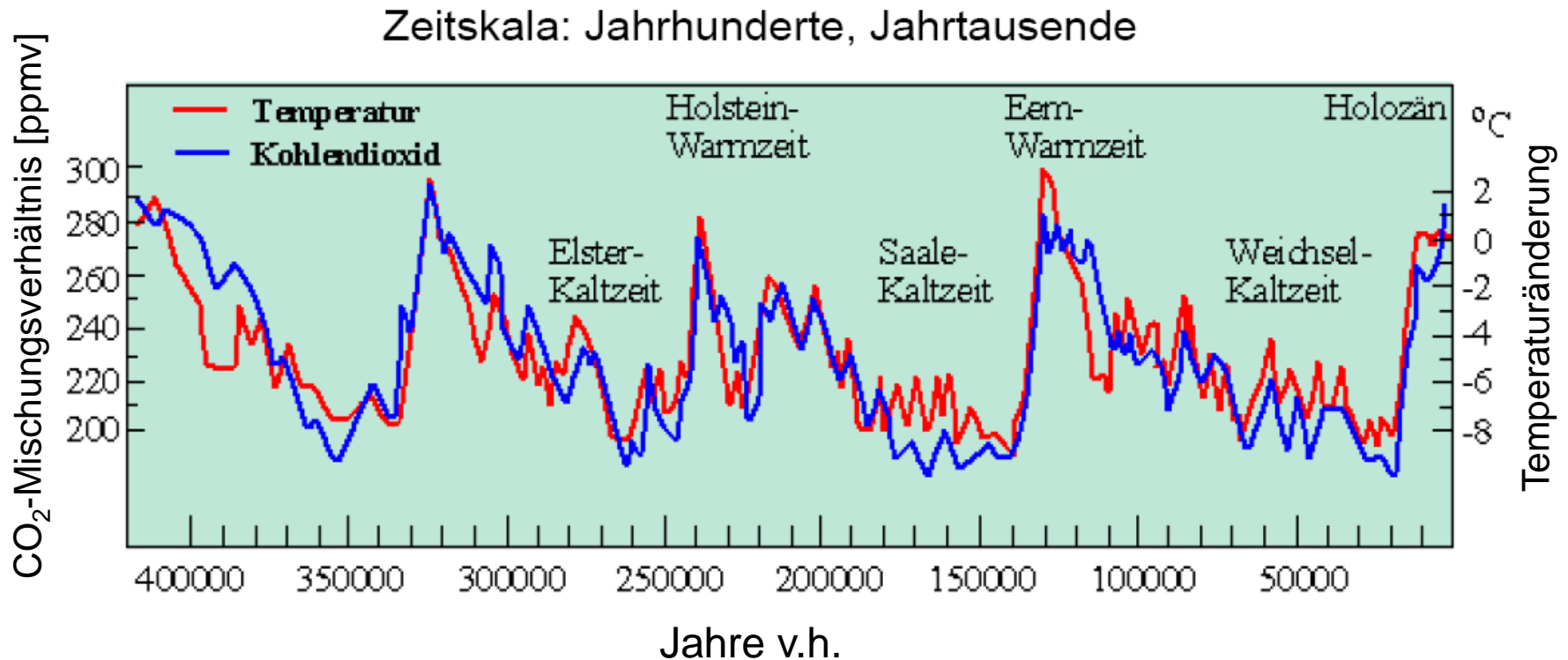
## Überblick

- Motivation:  
Variation des Klimawandels
- Allgemeines über die  
Stratosphäre und die  
Ozonschicht
- Veränderungen der  
Ozonschicht: Dynamische und  
chemische Einflüsse
- Einfluss des Klimawandels auf  
die Erholung der Ozonschicht

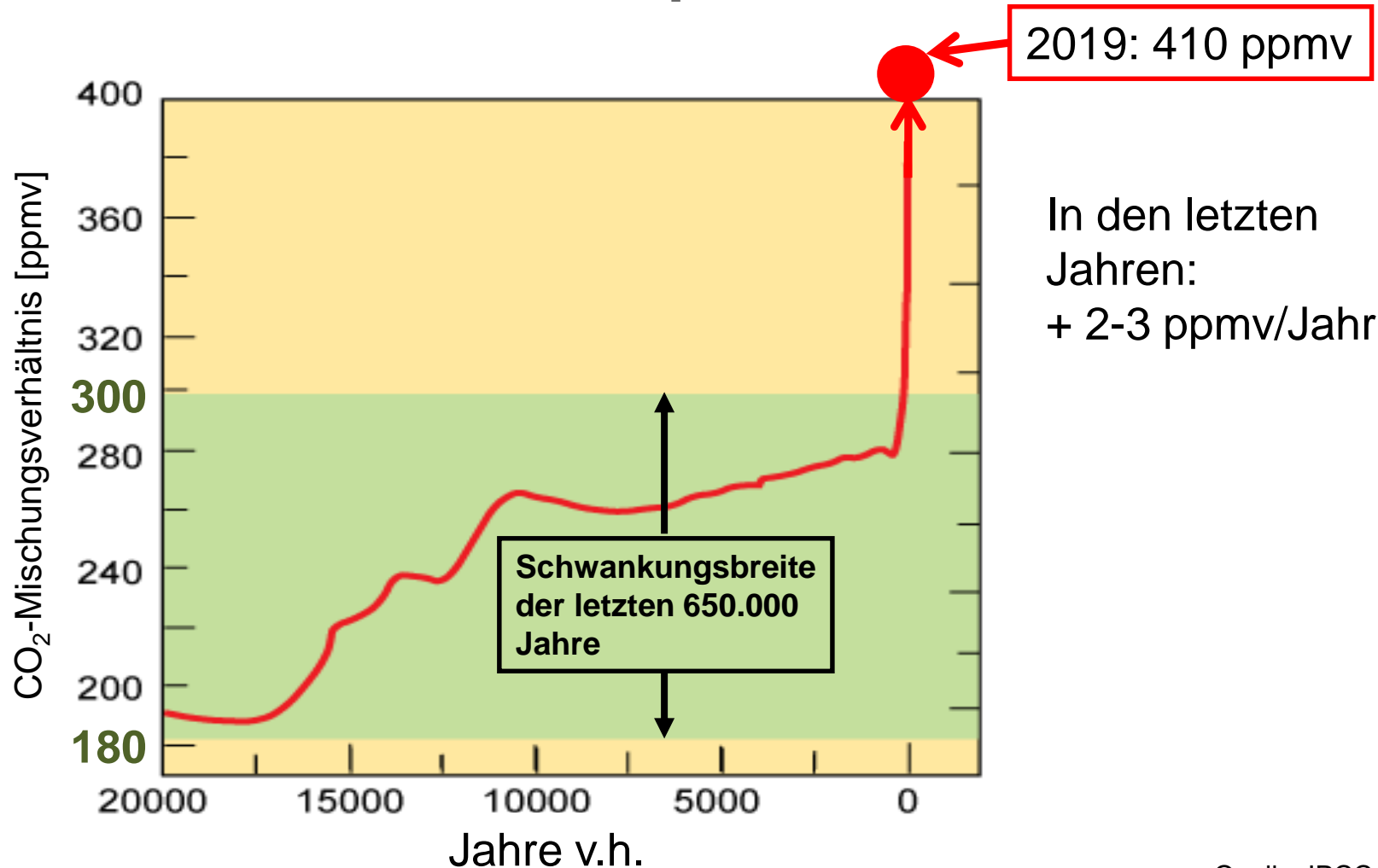


# Wie hat sich das Klima der Erde entwickelt?

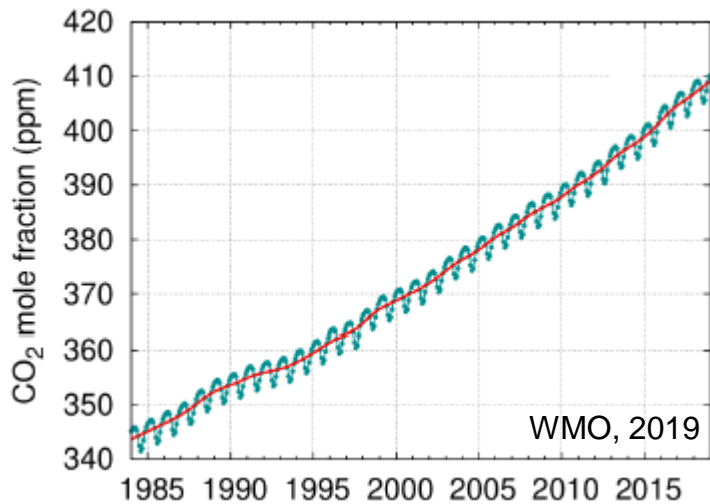
## ➤ Die letzten 420.000 Jahre ...



# Entwicklung des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre



# CO<sub>2</sub>-Mischungsverhältnis

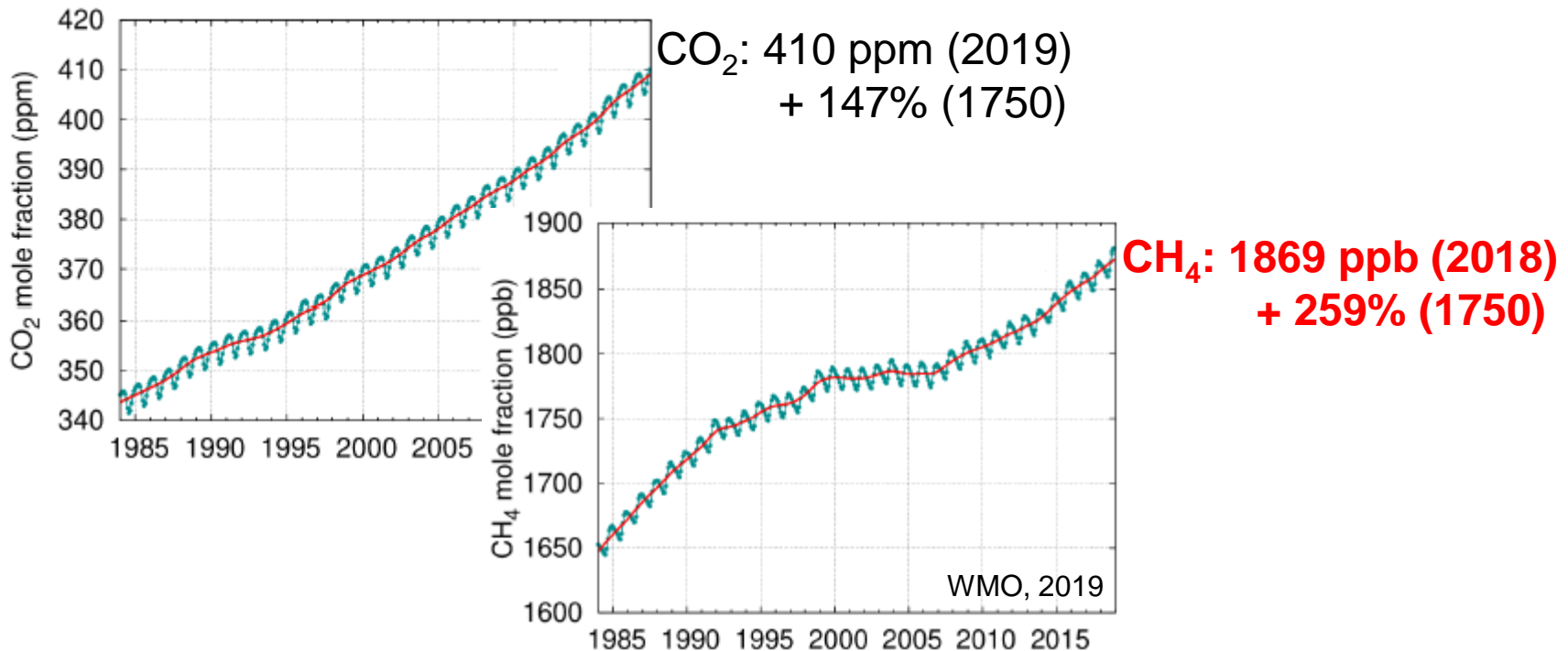


**CO<sub>2</sub>: 410 ppm (2019)**  
**+ 147% (1750)**

**ppm: parts per million** (wörtlich übersetzt „Anteile pro Million“).  $1\text{ppm} = 1 \cdot 10^{-6}$   
**ppb: parts per billion** (wörtlich übersetzt „Anteile pro Milliarde“).  $1\text{ppb} = 1 \cdot 10^{-9}$



# CH<sub>4</sub>-Mischungsverhältnis

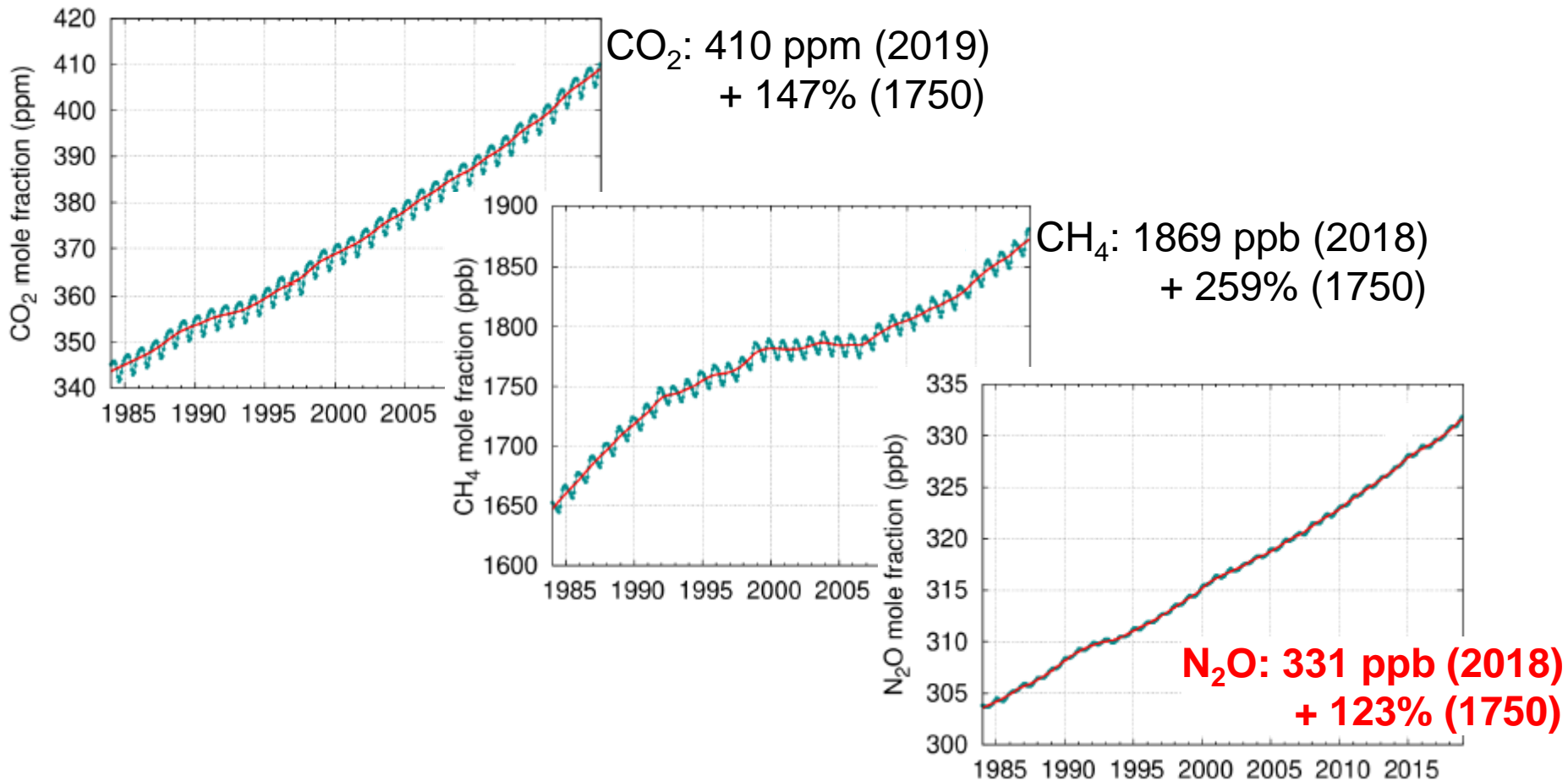


**ppm: parts per million** (wörtlich übersetzt „Anteile pro Million“).  $1\text{ppm} = 1 \cdot 10^{-6}$   
**ppb: parts per billion** (wörtlich übersetzt „Anteile pro Milliarde“).  $1\text{ppb} = 1 \cdot 10^{-9}$





# N<sub>2</sub>O-Mischungsverhältnis

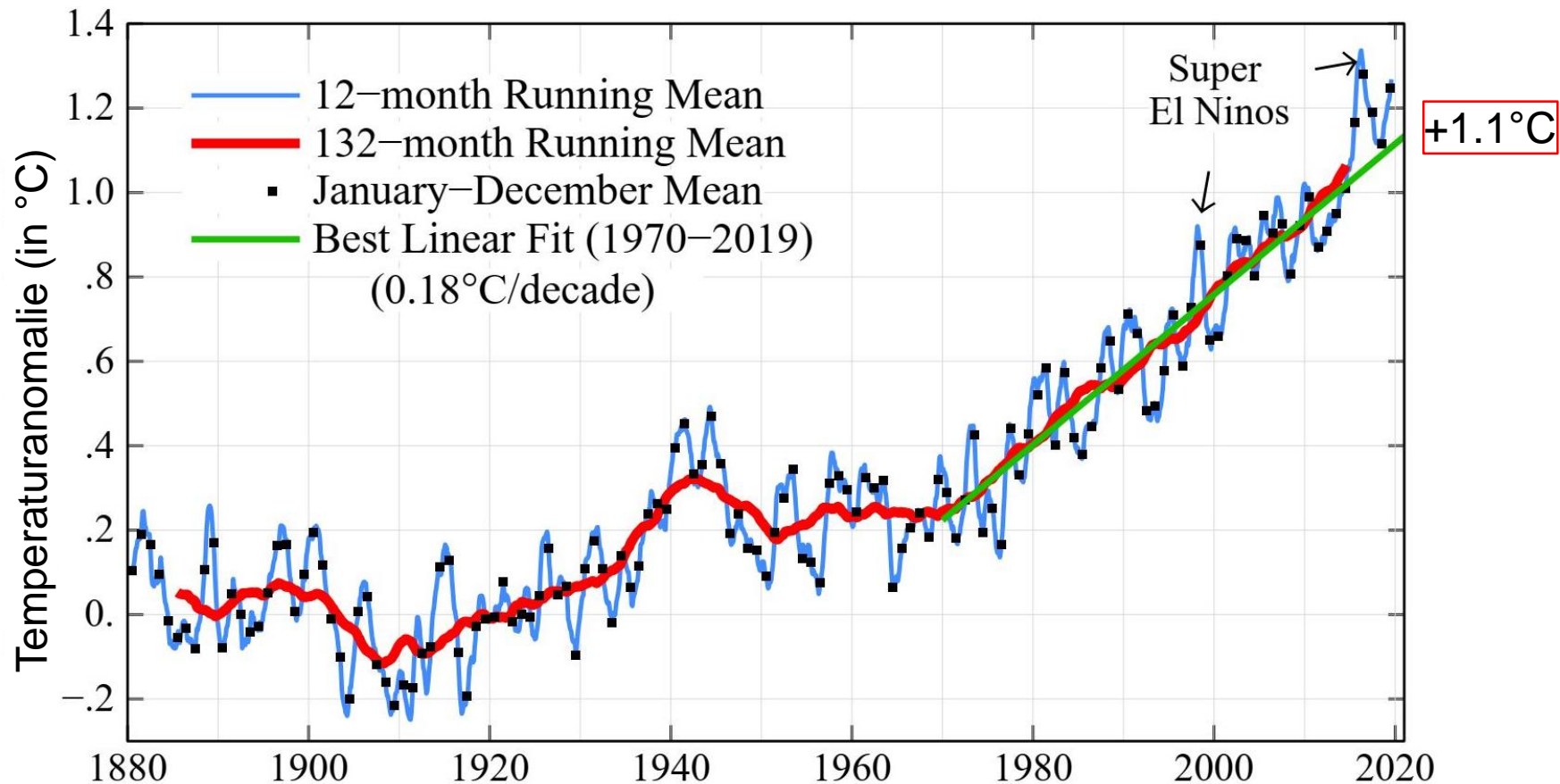


WMO, 2019

**ppm: parts per million** (wörtlich übersetzt „Anteile pro Million“).  $1\text{ ppm} = 1 \cdot 10^{-6}$   
**ppb: parts per billion** (wörtlich übersetzt „Anteile pro Milliarde“).  $1\text{ ppb} = 1 \cdot 10^{-9}$



# Globale Bodentemperatur relativ zu dem Mittelwert von 1880 - 1920



More detail is available at

<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> and

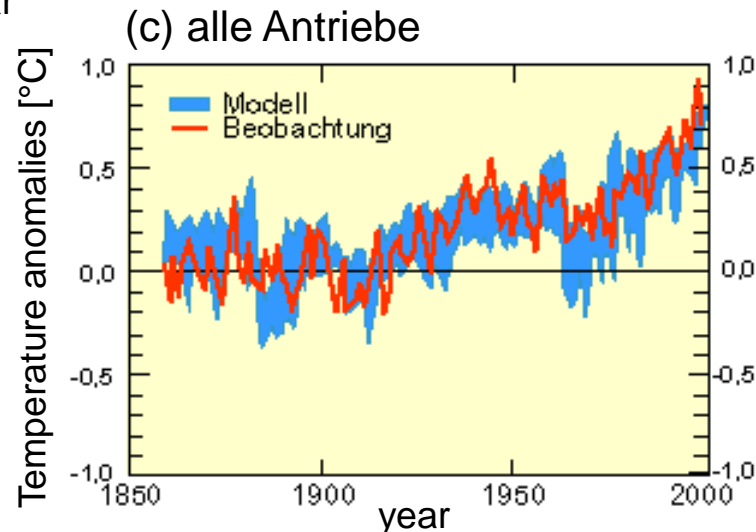
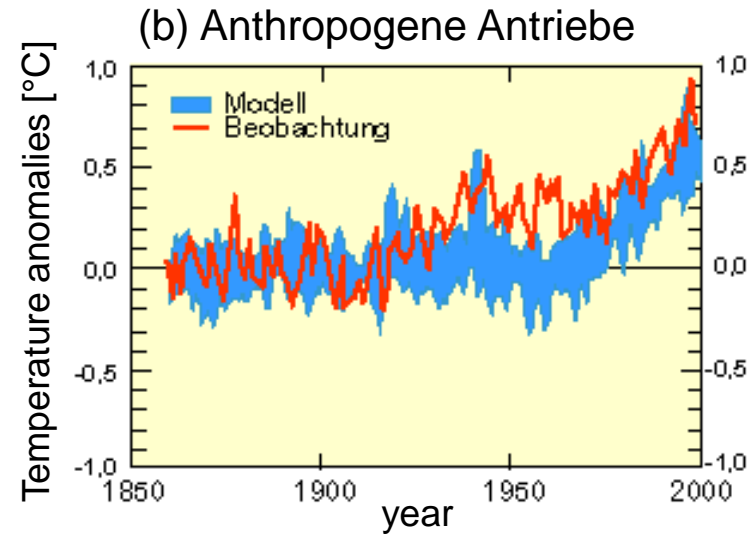
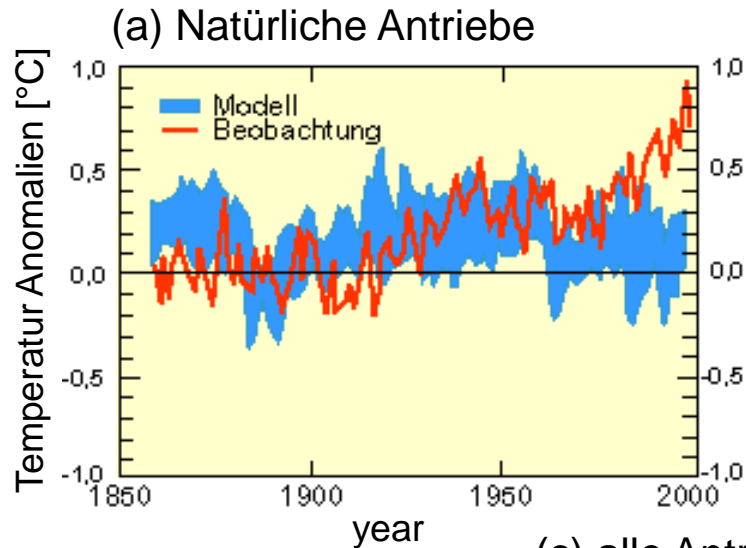
<http://www.columbia.edu/~mhs119/Temperature>

Hansen et al., 2020





# Was zeigen uns die Klimamodelle?



Modellergebnisse  
Beobachtungen



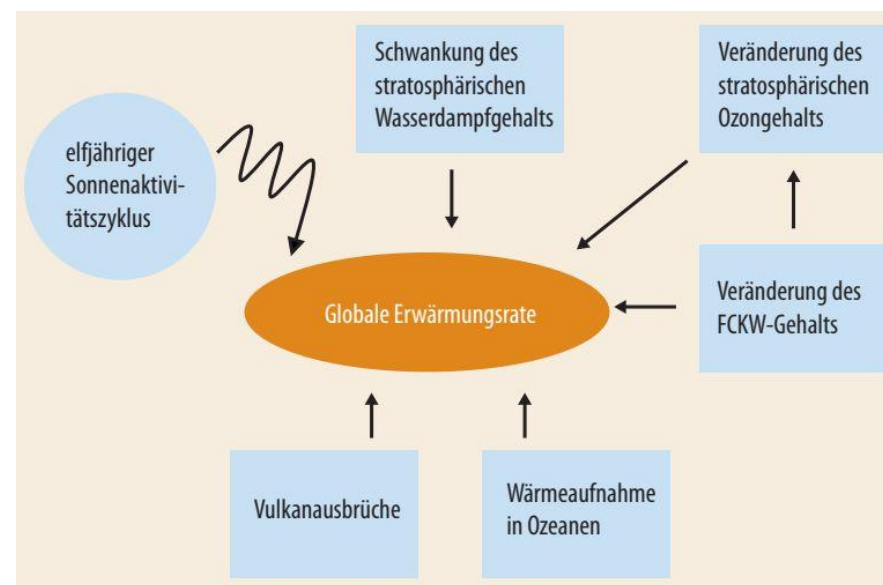
# Langzeitliche Veränderungen des Klimas und kurzzeitige Fluktuationen

Viele natürliche Faktoren beeinflussen die globale Erwärmungsrate:

- Die interne, natürliche Variabilität des Klimasystems
- Wärmeaufnahme in den unteren Ozeanschichten
- Der elfjährige Aktivitätszyklus der Sonne
- Große, eruptive Vulkanausbrüche

Die Rolle stratosphärischer Veränderungen:

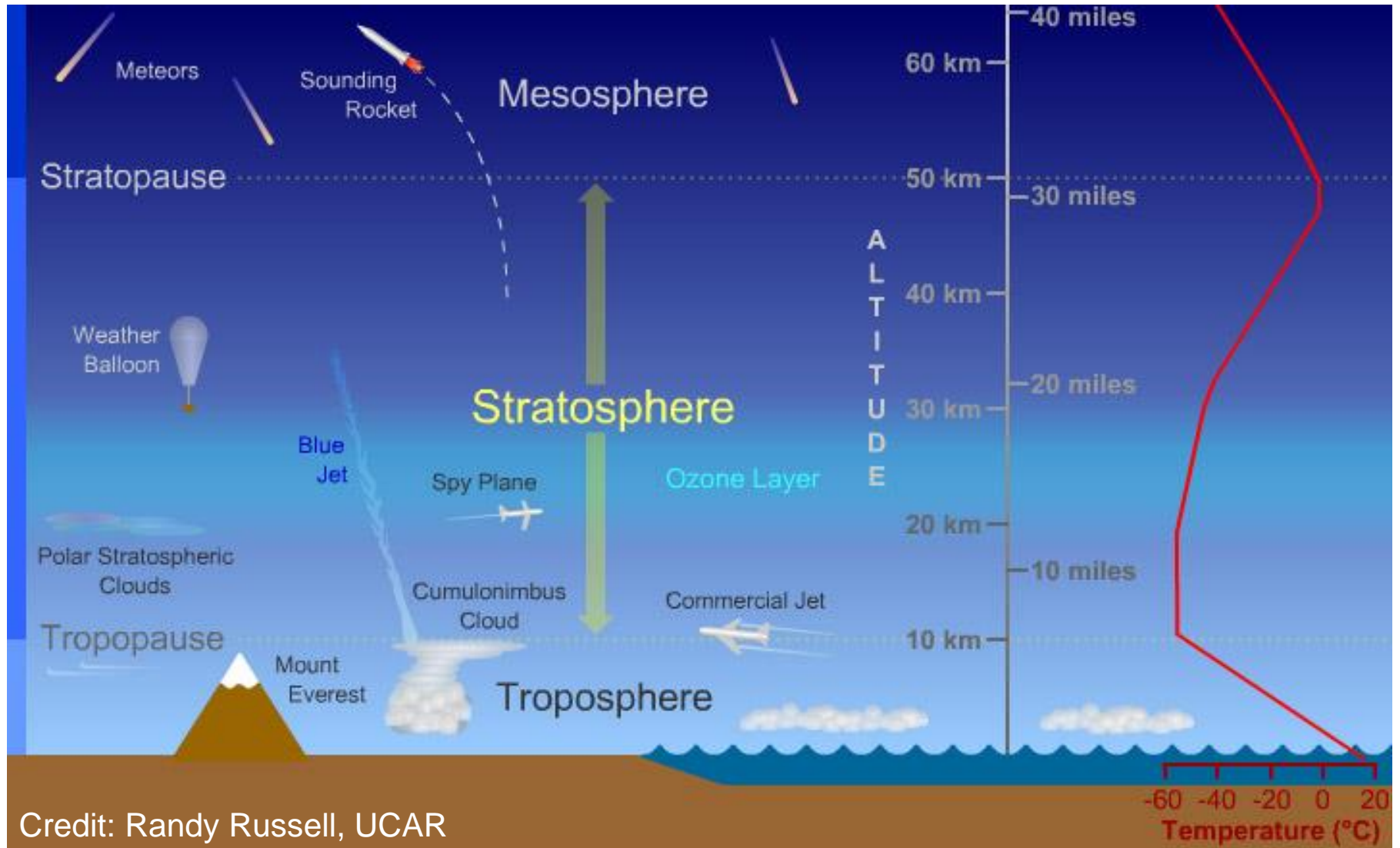
- Variationen des Wasserdampfgehalts
- Veränderungen des Ozongehalts (wichtige „Doppelrolle“ der FCKW)



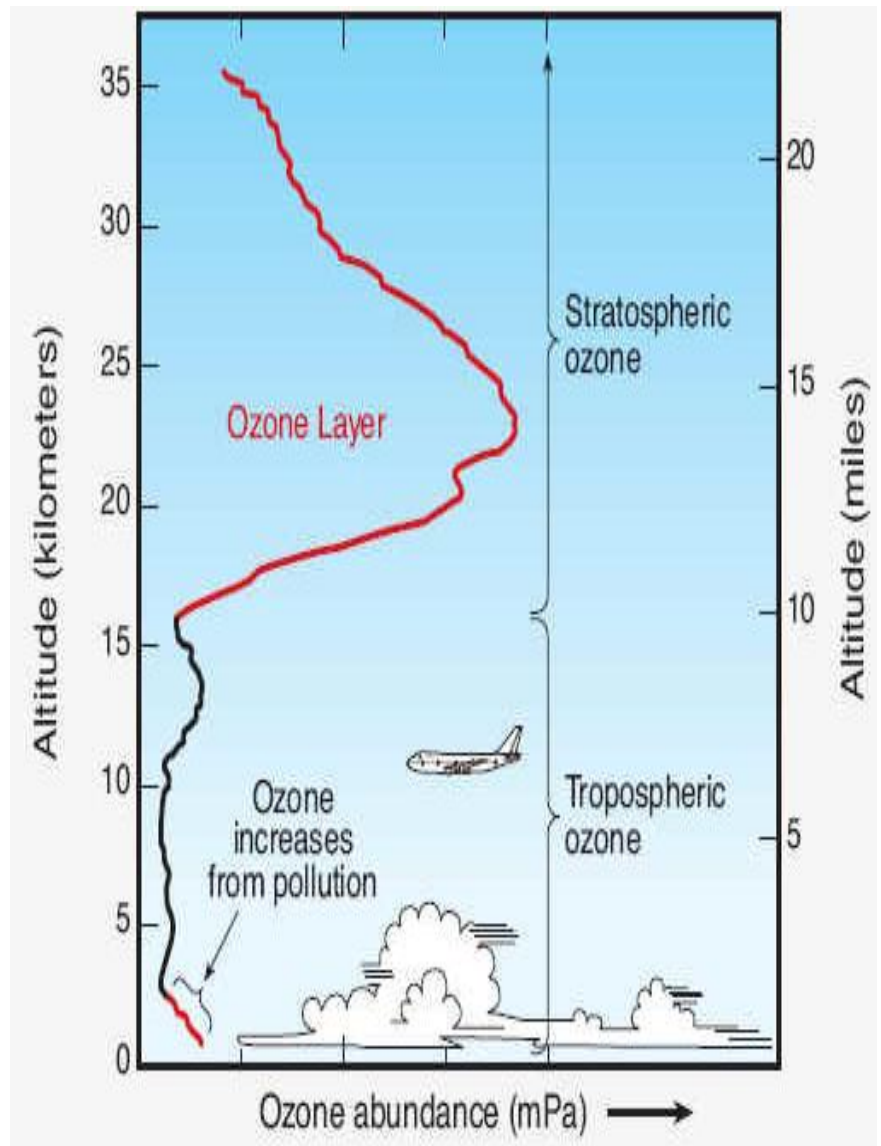
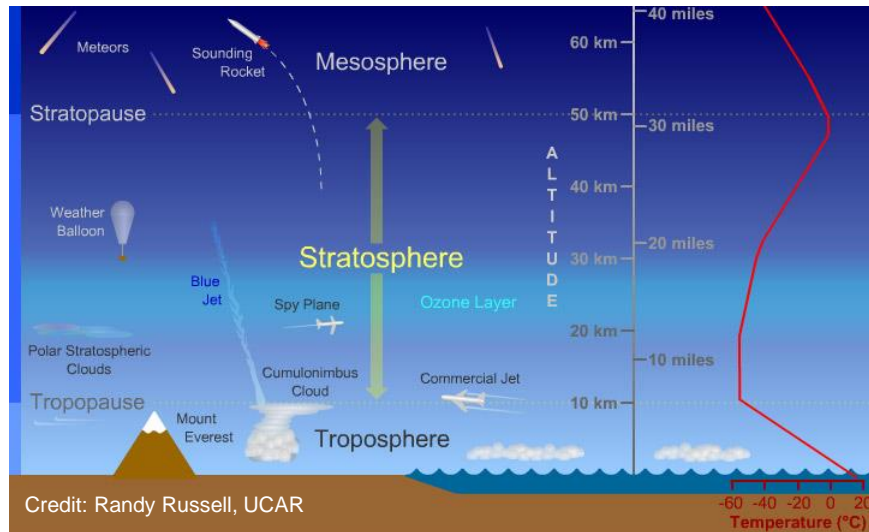
Treibhauspotential verschiedener Substanzen	
Treibhausgas	Treibhauspotential (relativ zu CO <sub>2</sub> ) pro Molekül
Kohlendioxid, CO <sub>2</sub>	1
Methan, CH <sub>4</sub>	~25
Distickstoffmonoxid, N <sub>2</sub> O	~300
Fluorchlorkohlenwasserstoffe, FCKW	~10 000



# Die Stratosphäre



# Die Stratosphäre



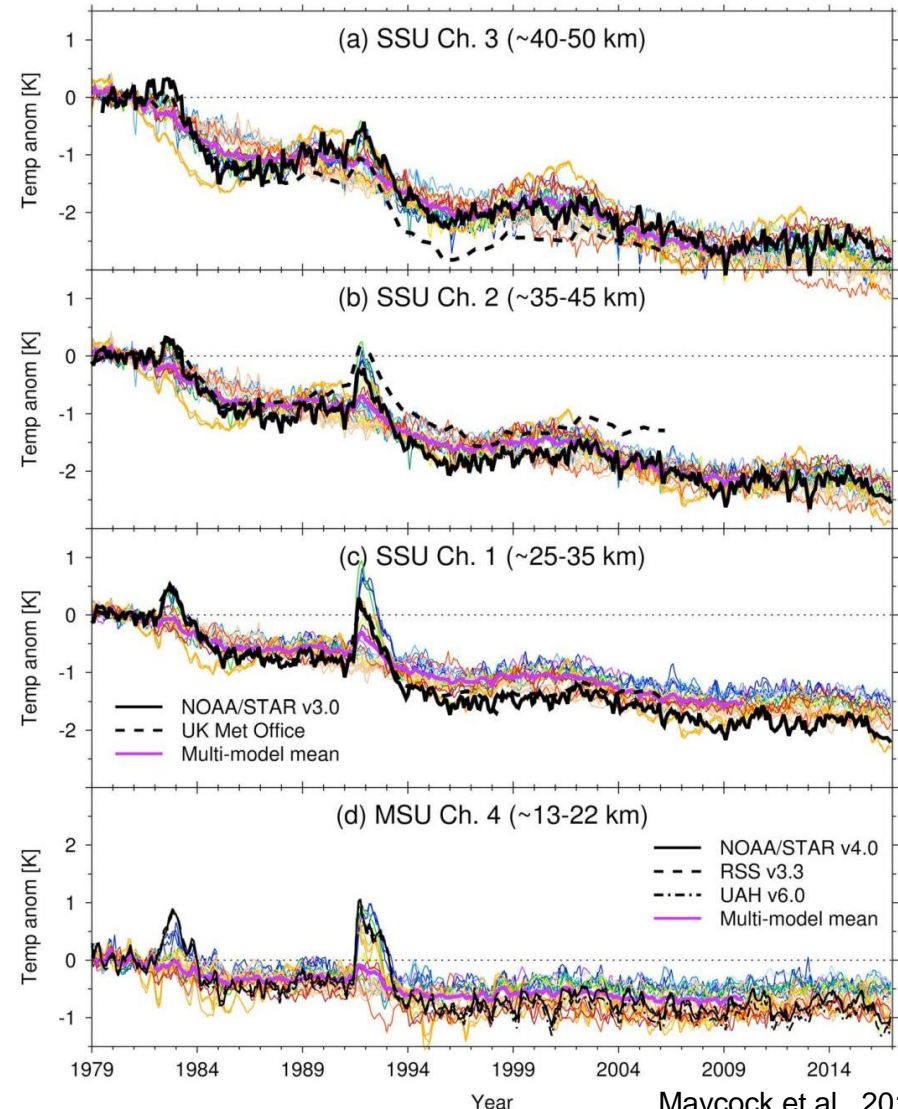
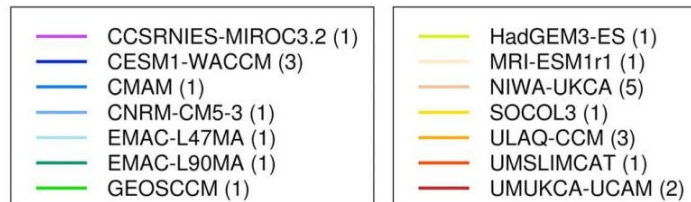


# Entwicklung der Stratosphäre im Klimawandel

Zunehmende Abkühlung der Stratosphäre mit der Höhe; Fluktuationen durch natürliche Vorgänge:

- Treibhausgase emittieren selbst Infrarot-Strahlung, wobei die Emission von der lokalen Atmosphärentemperatur abhängt.
- In der Stratosphäre emittieren Treibhausgase in der Regel mehr Infrarot-Strahlung als sie absorbieren, wodurch sich die Stratosphäre abkühlt.

Die Temperaturverteilung in der Atmosphäre beeinflusst deren Dynamik, also die resultierenden Luftbewegungen und Zirkulationsmuster.



Maycock et al., 2018

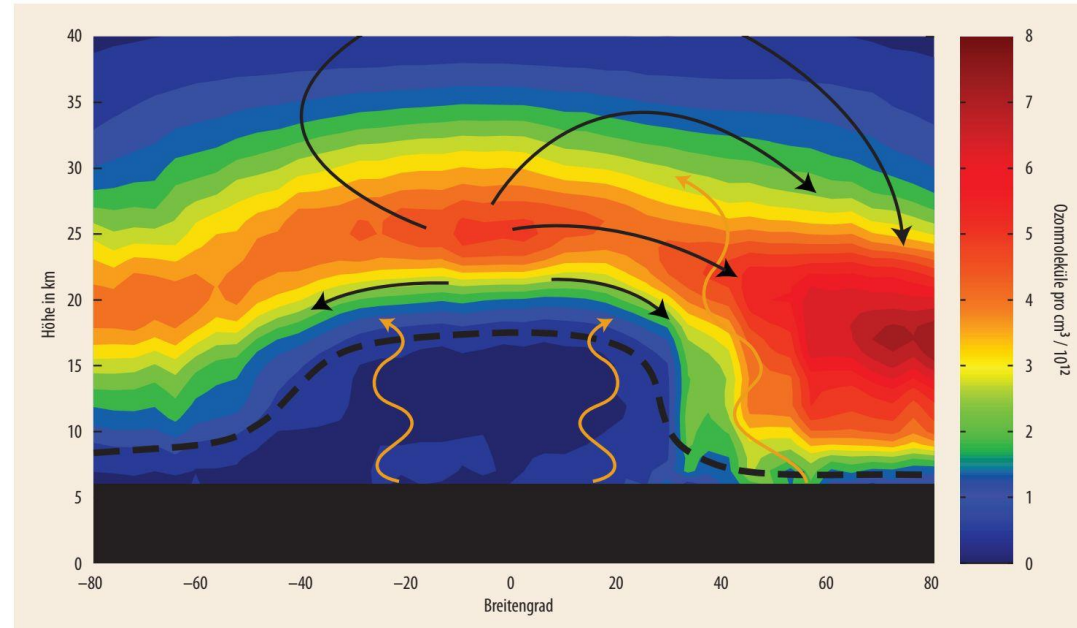


# Entwicklung der Stratosphäre im Klimawandel

Beispiel:

Die stratosphärische Meridionalzirkulation (Brewer-Dobson Zirkulation). Dieses Zirkulationssystem ist der bedeutendste Antrieb für den Transport von stratosphärischen Luftmassen aus niederen in höhere geografische Breiten.

Der Klimawandel modifiziert die antreibenden Prozesse der Brewer-Dobson Zirkulation und damit die Intensität der Luftmassentransporte sowie die Transportwege.



Typische Ozonverteilung im nordhemisphärischen Frühjahr

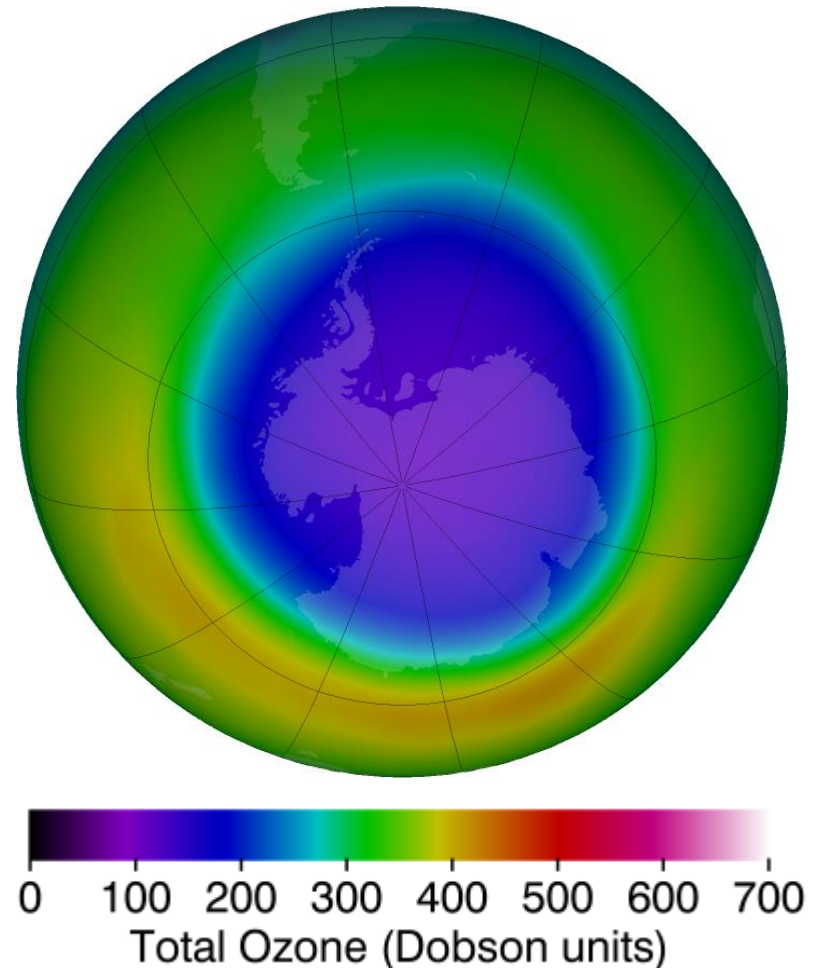


# Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht

Derzeit reduzieren (nach wie vor) erhöhte Konzentrationen von FCKW die Ozonschicht immer noch deutlich. Dieser stratosphärische Ozonabbau zeigt sich insbesondere durch das antarktische Ozonloch (Bild).

Durch das Montrealer Protokoll von 1987, einer Vereinbarung zum Schutz der Ozonschicht, wurden die Ozon zerstörenden Substanzen reglementiert.

Als Folge geht seitdem der troposphärische FCKW-Gehalt stetig zurück.

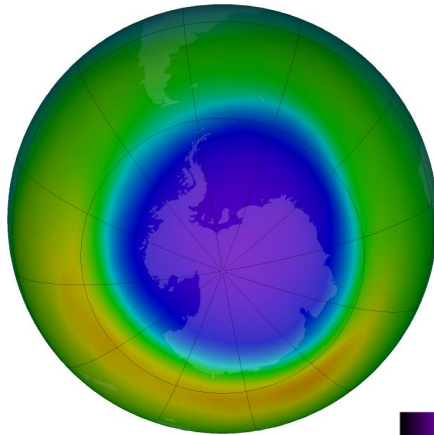


Antarktisches Ozonloch: Oktober 2018

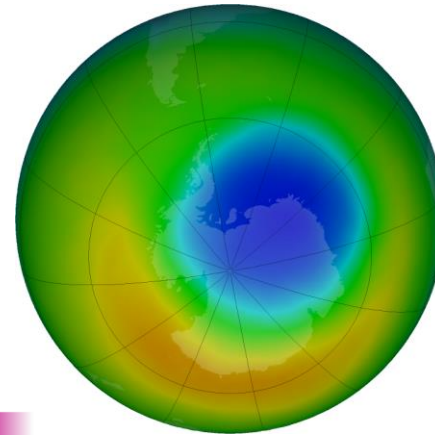


# Variationen der stratosphärischen Ozonschicht über den Polarregionen im Frühling

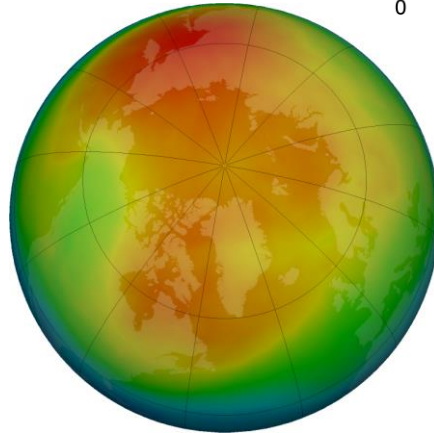
Antarktis: Oktober 2018



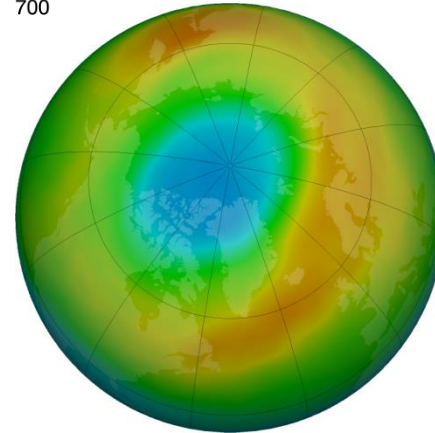
Antarktis: Oktober 2019



0 100 200 300 400 500 600 700  
Total Ozone (Dobson units)



Arktis: März 2019



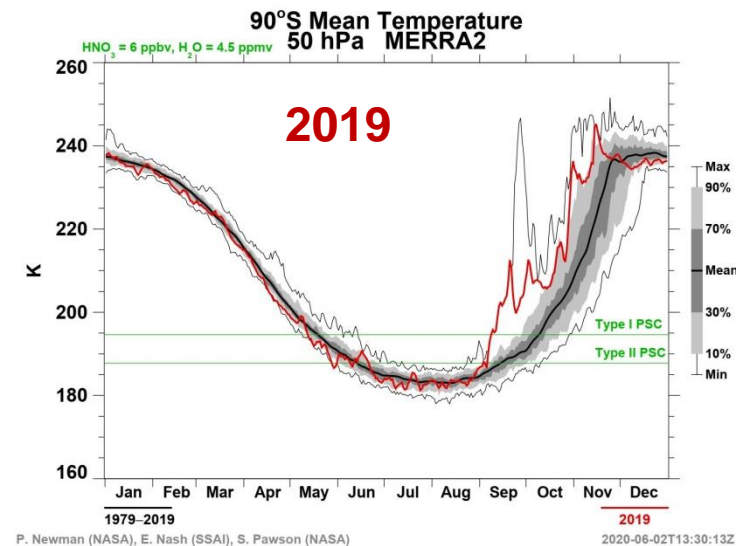
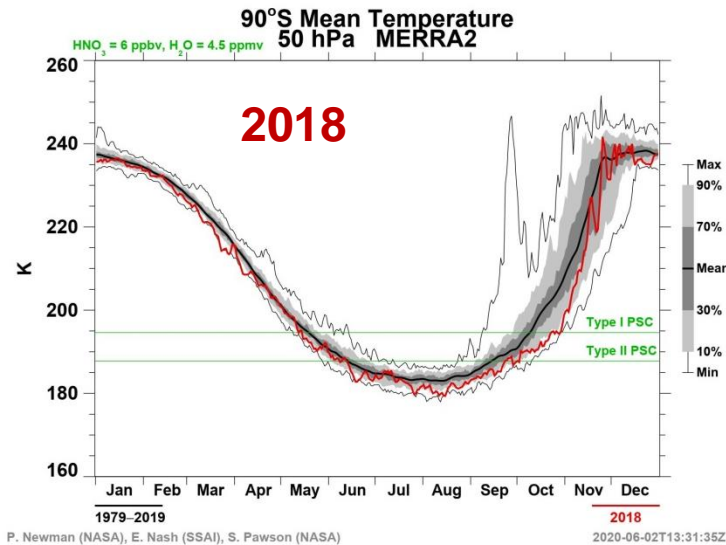
Arktis: März 2020

Source: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

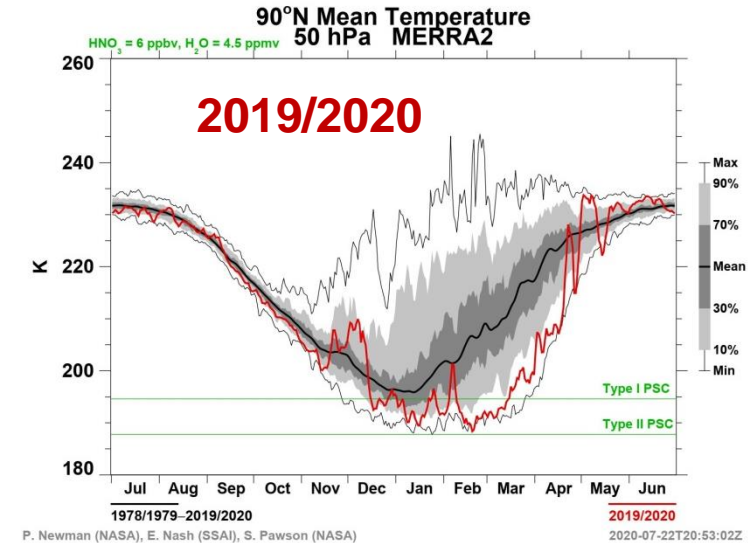
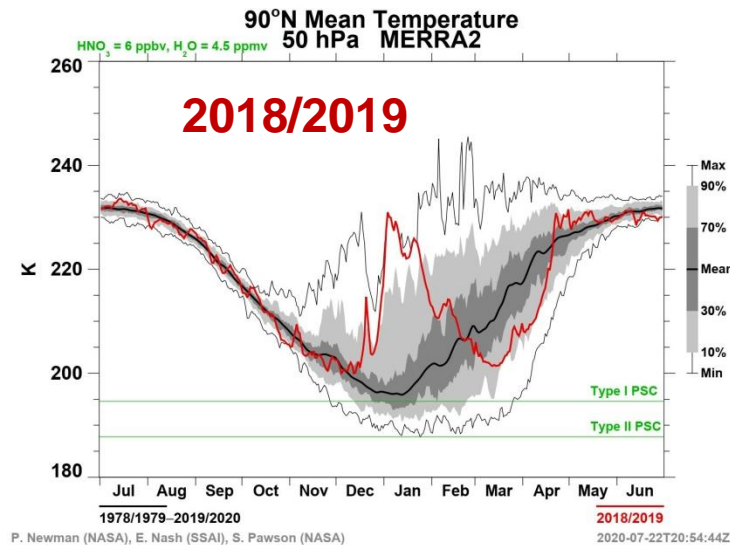




# Temperaturfluktuation in der Arktis und Antarktis



Südpol  
20 km

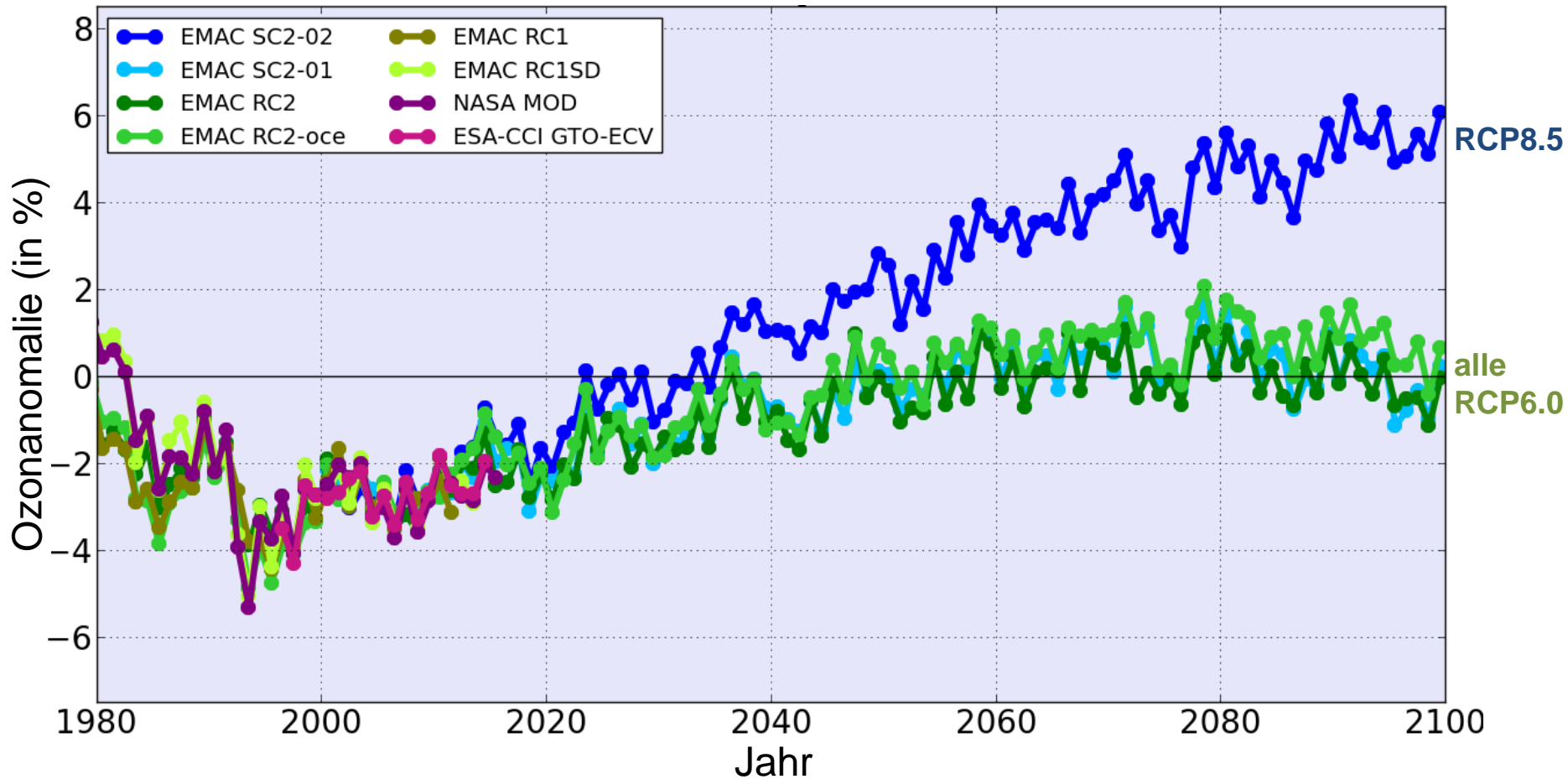


Nordpol  
20 km



# Ozonanomalien (1960-2100): 60°S - 60°N

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (EMAC) sowie Prognosen





# Ozontrends (in DU) in mittleren Breiten, den Tropen und im globalen Mittel (außerhalb der Polarregionen)

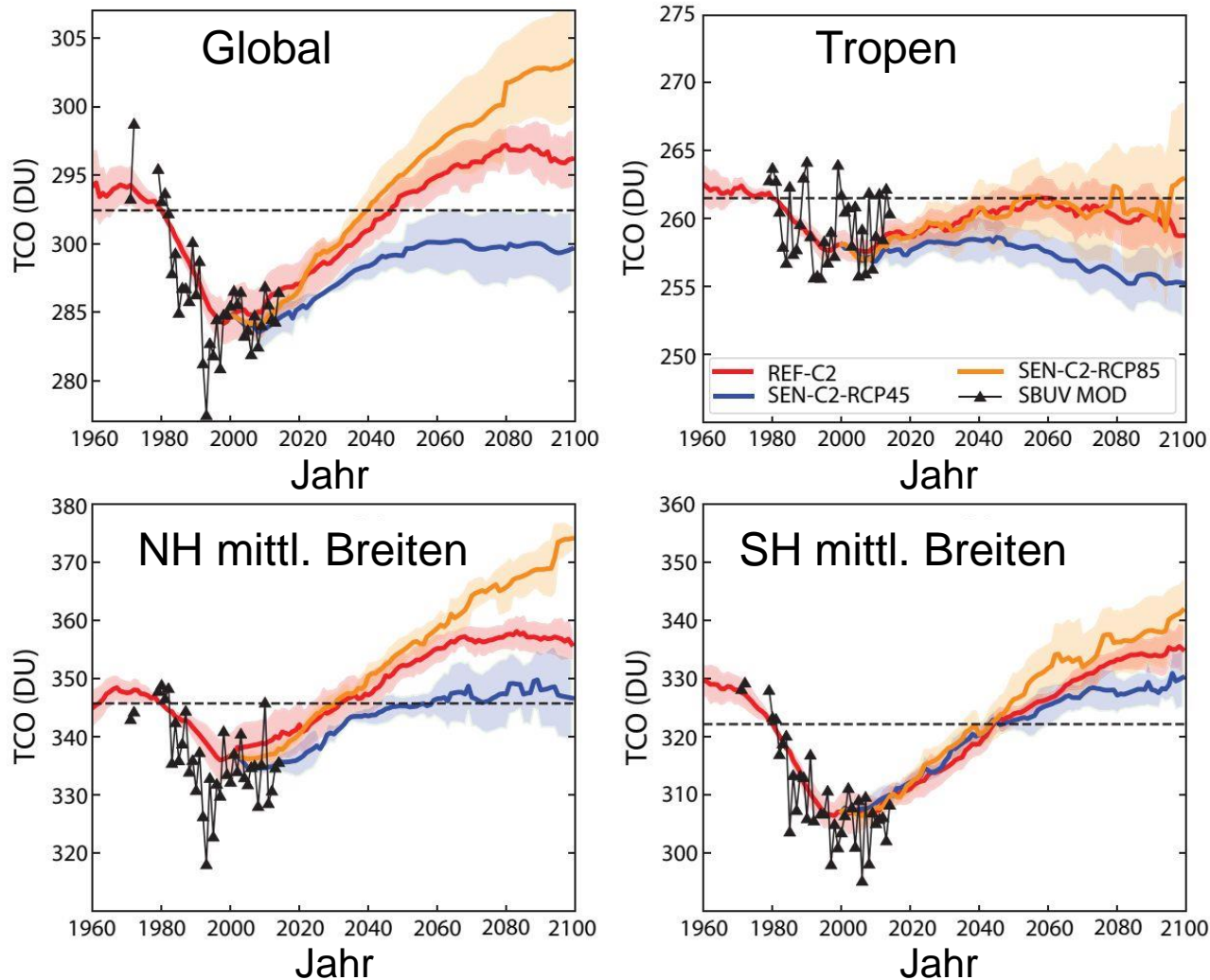
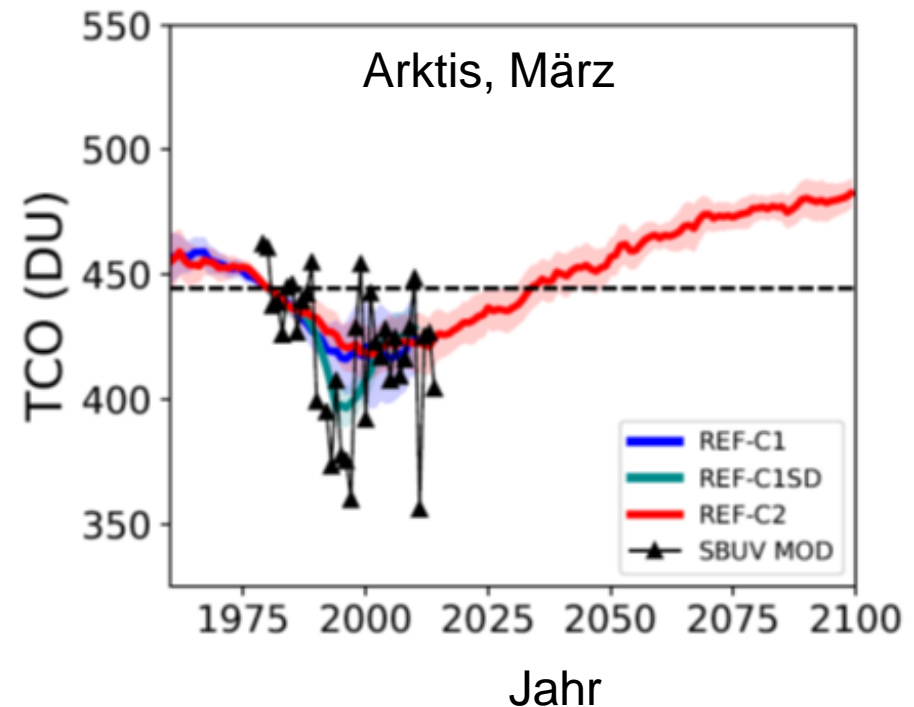
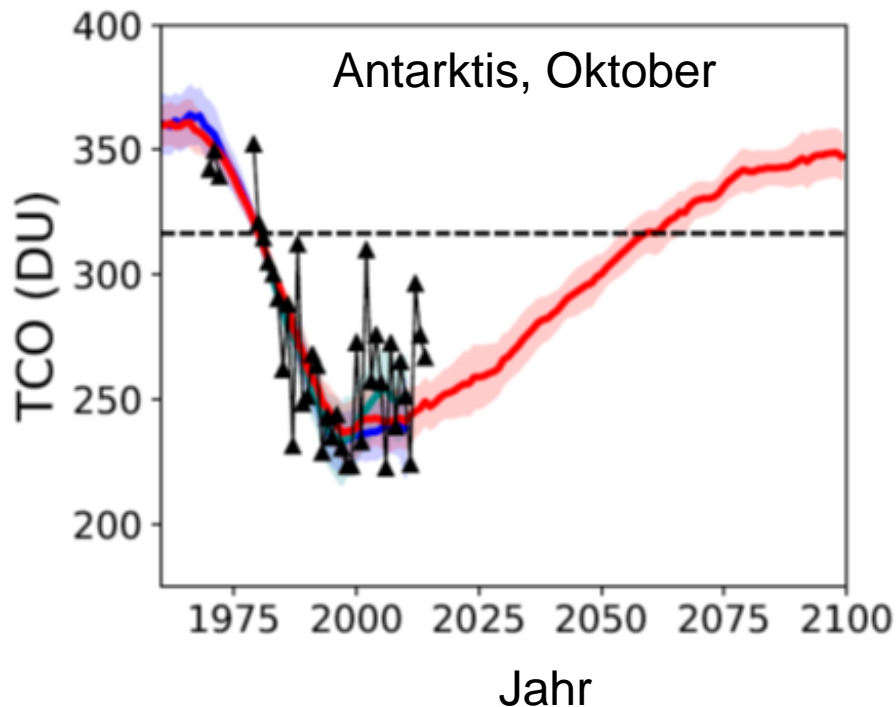


Abb. 3.29 in  
WMO, 2018



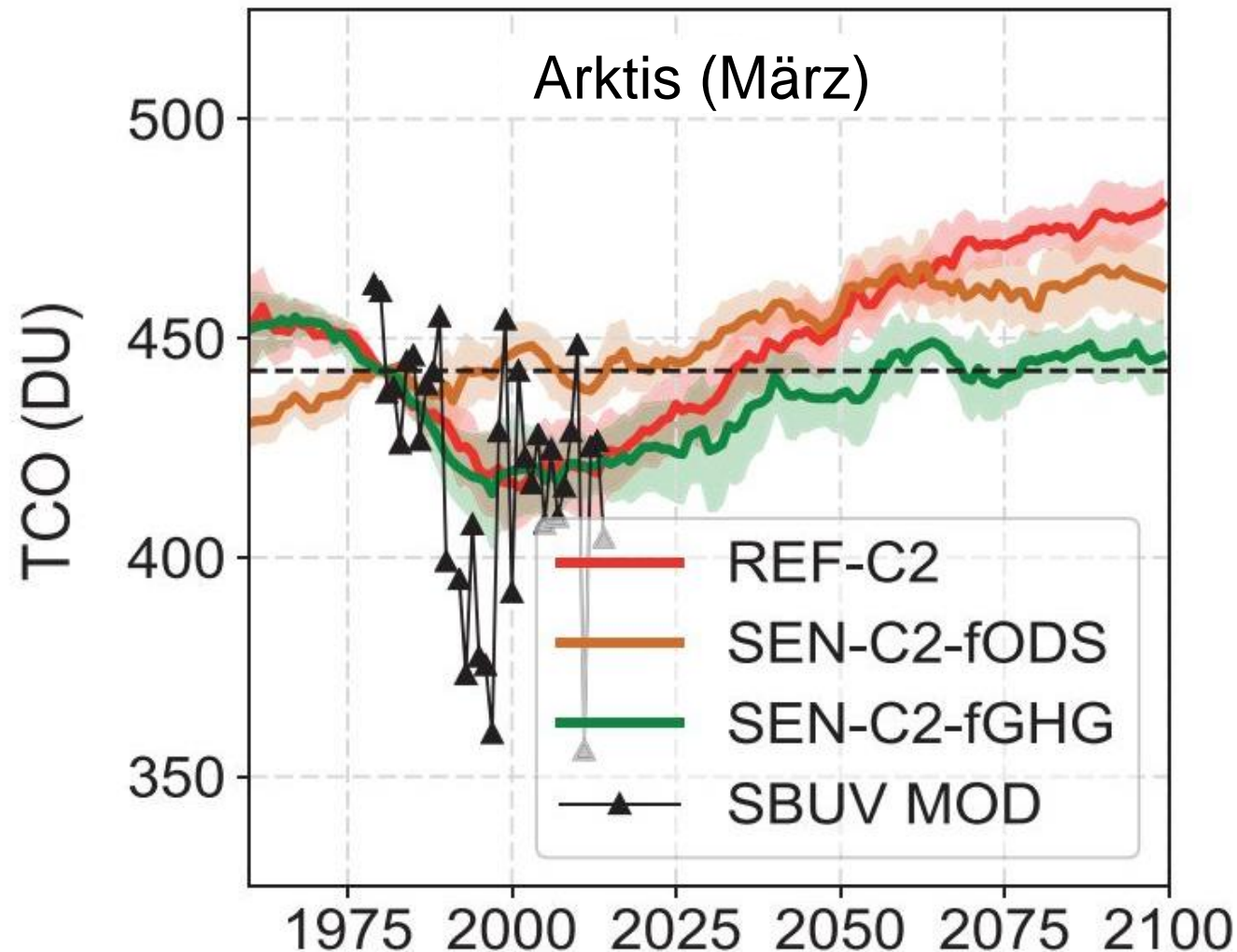
# Ozonänderungen (1970-2100): Polarregionen, Frühling

## Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (MMM) sowie Prognosen



# Ozonänderungen (1960-2100): Polarregionen

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (MMM) sowie Prognosen

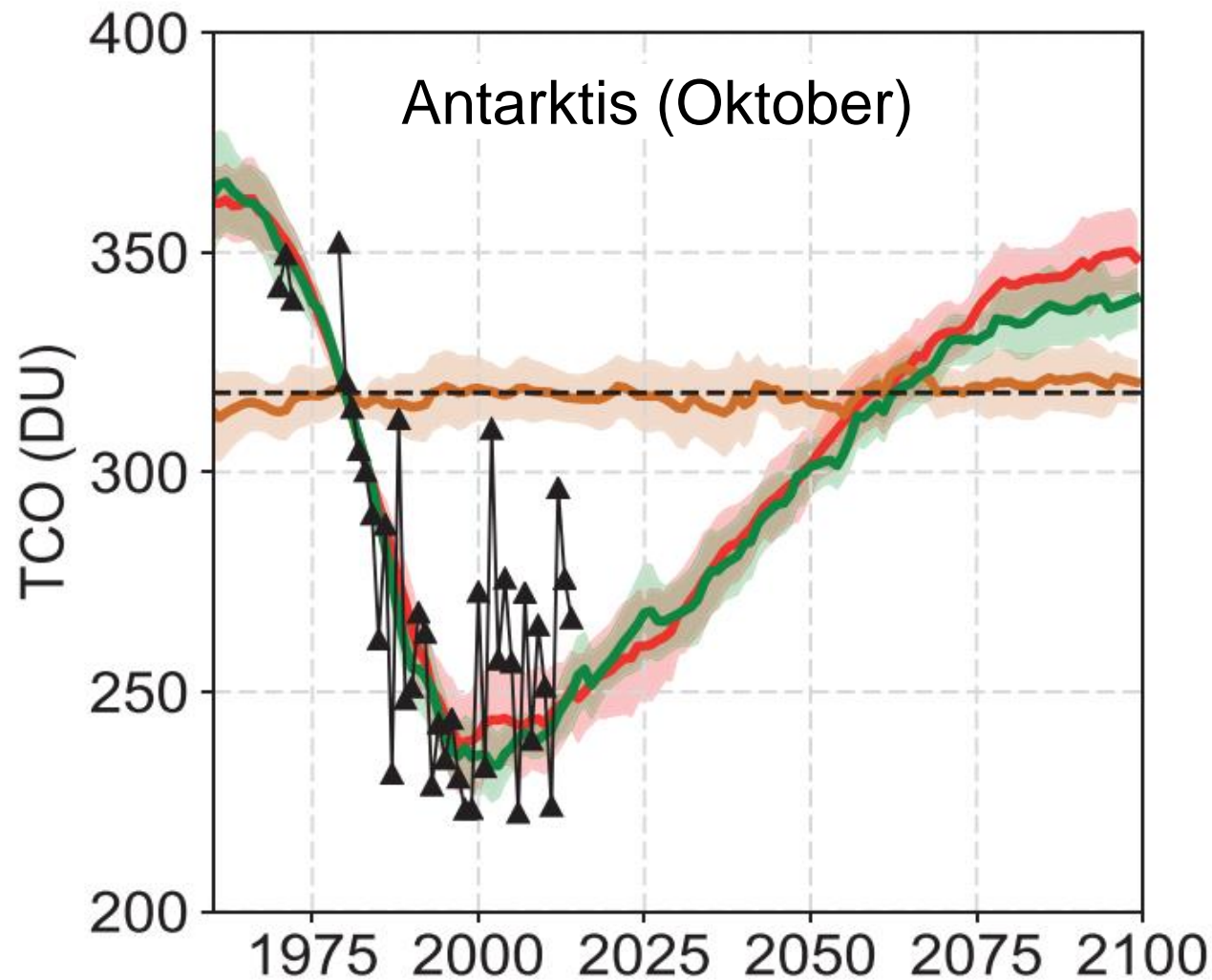
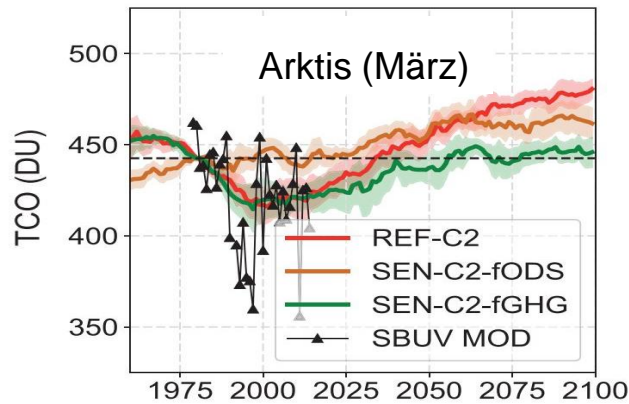


(Abb. 4-19 in WMO, 2018; adopted from Dhomse et al., 2018)



# Ozonänderungen (1960-2100): Polarregionen

Vergleich von Satelliten- und Modelldaten (MMM) sowie Prognosen



(Abb. 4-19 in WMO, 2018; adopted from Dhomse et al., 2018)





# Zusammenfassung

- Numerische Modelle der Erdatmosphäre („Klimamodelle“) sind in der Lage die vergangenen Veränderungen weitestgehend zu reproduzieren. Dazu sind natürliche Vorgänge zu berücksichtigen.
- Die Erholung der Ozonschicht, vor allem im Bereich der Arktis, hängt deutlich vom Klimawandel ab.
- Unter der Annahme der vollständigen Umsetzung des Montrealer Protokolls werden in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts die Treibhausgase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  die dominierenden Antriebe für nordpolare Ozonänderungen sein.
- Der große Bereich der möglichen zukünftigen Niveaus der Treibhausgaskonzentrationen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$ ) stellt eine große Unsicherheit hinsichtlich der Abschätzung der Erholung bzw. der weiteren Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht dar.

